Fascicule de TD de P1-1 : Section 1 et 2

Capacité thermique de l'eau $c = 4,18$ kJ.kg^{-1}.K^{-1}
Constante universelle des gaz parfaits : $R = 8,314$ J.mol^{-1}.K^{-1}

Semaine 5 - Séance 1

SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES À L'ÉQUILIBRE ET NOTION DE TRANSFORMATIONS

Exercice 1 — Étude expérimentale de différents gaz parfaits

A. On étudie expérimentalement n moles d'air à la pression $P = 1,013$ bar. On a relevé pour cela diverses valeurs de température θ et de masse volumique μ.

θ (°C)	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0
μ (kg.m^{-3})	1,293	1,270	1,247	1,226	1,205	1,184	1,165	1,146

1. Donner l'équation d'état des gaz parfaits en fonction de P, T, M (masse molaire du gaz) et μ.
2. On veut savoir si le gaz étudié expérimentalement se comporte comme un gaz parfait.
   a. Si on trace la courbe μ en fonction de $\frac{1}{T}$, que doit-on obtenir comme courbe dans le cas d'un gaz parfait ?
   b. À partir des valeurs expérimentales données, tracer μ en fonction de $\frac{1}{T}$. On utilisera les unités du système international.
   c. Le gaz est-il parfait ? Justifier votre réponse.
   d. En déduire la valeur de la masse molaire M de l'air.

B. On étudie maintenant une mole de vapeur d'eau à la température $T = 773,15$ K. On mesure, pour diverses valeurs de la pression P, les valeurs du volume V.

P (bar)	1	20	70	100
V (L)	64,3	3,17	0,87	0,59

1. Justifier que ce gaz n'est pas parfait.
2. On utilise le modèle de Van Der Walls pour décrire ce gaz.
   a. Donner l'équation d'état de ce gaz.
   b. Expliquer brièvement pourquoi on ajoute des termes par rapport à l'équation des gaz parfaits.

Exercice 2 — Transformation isochore

Un récipient clos contient un gaz à 17°C sous la pression atmosphérique.

1. À quelle température faut-il porter le gaz pour que la pression augmente de 50% ?
2. Représenter cette transformation dans le diagramme de Clapeyron $P = f(V)$.
3. Déterminer la quantité de matière n de gaz si le volume du récipient V vaut $V = 12$ L et que le gaz est initialement à la pression atmosphérique.

Exercice 3 — Application à quelques transformations particulières

Chapitre 1 – Partie VI à compléter

Exercice 4 — Suite de transformations

Un cylindre vertical initialement vide, fermé par un piston mobile sans frottement appréciable, est à la pression atmosphérique. On introduit de l'air dans le cylindre et on attend l'équilibre thermodynamique.

1. Calculer la pression du gaz sachant que le piston a une section $S = 20\text{cm}^2$ et une masse $m = 4,0$ kg.
2. La distance du piston au fond du cylindre était de $h_1 = 20$ cm. De combien se déplace le piston quand on rajoute sur sa face supérieure une masse de $M = 2,0$ kg, sachant que la température garde une valeur constante de $\theta_1 = 15$°C ?
3. À quelle température T_3 faut-il porter le gaz pour que le piston reprenne sa position initiale ?
4. Achever le calcul de toutes les variables d'état du système, puis représenter cette suite de transformations en coordonnées (P, V) sur un seul diagramme.

Semaine 6 - Séance 2

DIFFÉRENTIELLE D'UNE FONCTION D'UNE VARIABLE

Exercice 5 Dilatation d'un cube

On considère un cube de matière d'arête $a_0 = 5$ cm ; son volume est alors égal à $V_0 = a_0^3 = 125$ cm^3.
Par dilatation thermique, l'arête du cube augmente de 10%, 1% ou 0, 1%.
Remplir le tableau suivant à 10^{-2} cm^3 près, et comparer la variation de volume δV avec la différentielle du volume dV en fonction de a.
Que peut-on conclure concernant l'utilisation du calcul différentiel ?

a (cm)	5,5	5,05	5,005
ΔV (cm^3)			
dV (cm^3)			

À rédiger pour la semaine 9 - Séance 3

Exercice C1 Un autre modèle de gaz

Considérons un réservoir de volume $V = 2,0$ L contenant $n = 1,0$ mol de dihydrogène à une température $T = 1000$ K.

1. Si le dihydrogène se comporte comme un gaz parfait quelle serait la pression P_0 de ce gaz ?

Supposons maintenant que le dihydrogène suit l'équation d'état suivante :

$$P(V_m - b) = RT \exp\left(-\frac{a}{RTV}\right) \text{ avec } a = 3,4.10^{-3} \text{ SI } b = 2,3.10^{-5} \text{ SI.}$$

2. Donner les dimensions de a et b.
3. Donner les hypothèses reliant les variables d'état aux paramètres a et b permettant de retrouver l'équation d'état des gaz parfaits ? Commenter.
4. Quelle est la pression P'_0 du gaz dans ce nouveau modèle ? Commenter.

Exercice C2 Sonder l'atmosphère

Nous allons étudier un ballon sonde déformable contenant de l'hélium (que l'on assimilera à un gaz parfait), nous supposerons que le ballon est imperméable et sphérique, nous négligerons la masse de la membrane du ballon et nous supposerons dans chacun des cas suivant le ballon à l'équilibre thermique.
Au niveau de la mer, pour une température $T = 20°$C et une pression atmosphérique $P = 1,0$ atm, le ballon a un rayon $r = 1,0$ m. On lâche le ballon qui monte jusqu'à son altitude maximale, où la température vaut $T' = -20°$C et son rayon est $r' = 3,0$ m.

1. Expliquer pourquoi les pressions à l'intérieur et à l'extérieur du ballon sont-elles égales au niveau de la mer et à son altitude maximale.
2. Donner la quantité de matière n d'hélium contenue dans le ballon.
3. En déduire la pression P à l'intérieur du ballon à son altitude maximale.

Semaine 9 - Séance 3

Exercice 6 Formules d'approximation en physique

À l'aide du calcul différentiel appliqué aux petites variations, déterminer les expressions linéarisées approchées de :

* $\sin x$ au voisinage de $x = 0$
* e^x au voisinage de $x = 0$
* $\ln(1 + x)$ au voisinage de $x = 0$
* $\cos x$ au voisinage de $x = \frac{\pi}{2}$

FONCTIONS DE PLUSIEURS VARIABLES

Exercice 7 Dérivées partielles

1. Calculer les dérivées partielles au 1^{er} ordre de la fonction $f(x, y) = \frac{x^2}{y} - x \ln x$ et écrire la différentielle df de la fonction f.
2. Calculer les dérivées partielles au 2^{eme} ordre de $f(x, y)$. Comparer.

Exercice 8 Coefficients thermoélastiques d'un gaz parfait et d'un gaz réel

1. Exprimer, dans le cas d'un gaz parfait, les coefficients de compressibilité isotherme χ_T et de dilatation isobare α.
2. On étudie un fluide qui vérifie l'équation d'état suivante :

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = RT$$

   a. On peut écrire cette équation sous la forme $f(P, V, T) = 0$. Déterminer la différentielle df de cette fonction.
   b. En déduire les coefficients thermoélastiques du gaz.

   On rappelle les définitions des coefficients de compressibilité isotherme χ_T et de dilatation isobare α.

$$\chi_T = -\frac{1}{V}\left.\frac{\partial V}{\partial P}\right|_T \text{ et } \alpha = \frac{1}{V}\left.\frac{\partial V}{\partial T}\right|_P$$

Semaine 10 - Séance 4

PREMIER PRINCIPE DES SYSTÈMES FERMÉS

Exercice 9 Intégration d'un travail élémentaire

Considérons deux états (1) et (2) d'un système constitué de n moles de gaz parfait. Les états (1) et (2) sont définis respectivement par : (P_1, V_1, T_1) et (P_2, V_2, T_2).
Envisageons également deux suites de transformations lentes qui permettent de faire passer le système de l'état (1) à l'état (2) :

* chemin ⓐ : compression isotherme
* chemin ⓑ : contraction isobare puis échauffement isochore

1. Tracer les transformations ⓐ et ⓑ sur le même diagramme (P, V).
2. Déterminer le travail des forces de pression de l'état (1) à l'état (2), sur chacun des chemins ⓐ et ⓑ. Les résultats seront exprimés en fonction des seules données : n, P_1, V_1, T_1, P_2, V_2, T_2.

   Commenter.

Exercice 10 Transformations lentes d'un gaz parfait

Considérons un système constitué de n moles de gaz parfait, qui passe d'un état (1) défini par : (P_1, V_1, T_1) à un état (2) défini par : (P_2, V_2, T_2).
Les capacités thermiques C_V et C_P du gaz sont constantes.
Tous les résultats seront exprimés en fonction des seules données : C_V, C_P, P_1, V_1, T_1, P_2, V_2, T_2 et R.

1. Soit la compression isotherme LENTE, notée $T1$.
   a. Tracer la courbe de la fonction $P(V)$ qui représente la transformation $T1$ dans le plan de Clapeyron.
   b. Calculer le travail puis le transfert thermique reçus de l'extérieur par le gaz au cours de cette transformation.
   c. Représenter le travail reçu par le gaz dans le plan de Clapeyron.
2. Mêmes questions a et b pour chacune des transformations LENTES suivantes :
   $T2$: dilatation isobare
   $T3$: refroidissement isochore
   $T4$: détente adiabatique réversible
   $T5$: détente isotherme puis dilatation isobare
   $T6$: échauffement isochore puis contraction isobare.

Pour la semaine 11 - Séance 5

Finir l'exercice 10 (obligatoire).

Semaine 11 - Séance 5

Exercice 11 Gaz parfait dans un cylindre calorifugé

On considère un récipient cylindrique de section $\Sigma = 1,00$ cm^{2}dont la paroi supérieure est un piston qui glisse sans frottement. Ce cylindre est situé dans un laboratoire où la pression atmosphérique est $P_0 = 1,00.10^5$ Pa. Le poids du piston est négligeable devant la force due à la pression atmosphérique. Les parois du récipient et le piston sont calorifugés.
Ce récipient contient un gaz parfait monoatomique de rapport isentropique du gaz $\gamma = \frac{5}{3}$ et à l'équilibre (1) : La température vaut $T_1 = 300$ K et la hauteur de gaz est $h_1 = 10,0$ cm.

1. Calculer la quantité de matière de gaz contenue dans le récipient.
2. a. On ajoute successivement sur le piston de petites masses dont la masse totale est égale à $M = 1,00$ kg, et on attend qu'un nouvel état d'équilibre (2) s'établisse.
   Déterminer la position h_2 du piston ainsi que la température T_2 du gaz.
   b. On retire ensuite successivement toutes les petites masses posées sur le piston, et on attend qu'un nouvel état d'équilibre (3) s'établisse.
   Déterminer la nouvelle position h_3 du piston ainsi que la température T_3 du gaz.
   c. Représenter ces transformations dans le diagramme de Clapeyron.
3. On ramène le système dans l'état initial (1).
   a. On place sur le piston une masse $M = 1$ kg et on attend un nouvel équilibre (2′). Déterminer h'_2 et T'_2.
   b. On retire la surcharge M et on attend un nouvel équilibre (3′). Déterminer h'_3 et T'_3.

À rédiger pour la semaine 12 - Séance 6

Exercice C3 Mesure de γ

Considérons un cylindre de section $S = 2,0\text{cm}^2$ fermé par un piston de masse $m = 20$g pouvant coulisser sans frottement initialement bloqué par des taquets. Le volume du gaz (supposé parfait) dans le cylindre est alors $V_0 = 10$L et est à pression $P_0 = 1,0$ bar égale à la pression extérieure. L'axe (Oz) est vertical orienté vers le bas et soit z l'altitude du piston. On a $z = 0$ dans la position initiale.
À $t = 0$, le piston est libéré sans vitesse initiale. On note P la pression dans le cylindre et on suppose la transformation adiabatique et réversible.

1. Faire le bilan des forces s'exerçant sur le piston.
2. Sachant que le cylindre n'est pas calorifugé, quelle hypothèse peut on faire permettant de justifier que la transformation est adiabatique ? En déduire l'expression de la pression P en fonction de la position z du piston.

On admettra que, pour de faibles valeurs de z, la pression dans le cylindre est donnée par : $P = P_0\left(1 + \frac{\gamma S}{V_0} z\right)$, avec γ le rapport isentropique.

3. Déterminer l'équation différentielle décrivant l'évolution du piston au cours du temps et en déduire la période T des oscillations.
4. On mesure une période $T = 1,2$s. Donner la valeur de γ. Commenter.

Rappel : Lorsqu'un mouvement est régi par une équation différentielle de la forme $\ddot{y} + ay = 0$ alors ce mouvement est sinusoïdal de pulsation $\omega_0^2 = a$.

Semaine 12 - Séance 6

Exercice 12 Système composite

Un cylindre horizontal est divisé en deux compartiments A et B par un piston qui peut glisser sans frottement. A l'équilibre initial, chaque compartiment contient $V_0 = 20$ L d'oxygène à $\theta_0 = 27°$C sous une pression $P_0 = 1,0.10^5$ Pa. Les parois du cylindre et le piston sont calorifugés, les gaz sont des gaz parfaits. Dans le compartiment A, une résistance chauffante de capacité thermique négligeable devant celle du gaz, est parcourue par un courant électrique. On chauffe le gaz A jusqu'à un nouvel état d'équilibre caractérisé, pour le gaz B, par : $\theta_B = 140°$C et $P_B = 2,0.10^5$ Pa.
Rapport isentropique de l'oxygène : $\gamma = 1,4$

1. Déterminer par le calcul si la compression du gaz B est adiabatique réversible.
2. Calculer :
   a. La masse d'oxygène contenue dans chaque compartiment.
   b. Le volume final du gaz A.
   c. La température finale du gaz A.
   d. La variation d'énergie du gaz B.
   e. La variation d'énergie du gaz A.
   f. Le transfert thermique de la résistance au gaz A.
   g. Le travail reçu par le gaz B.

Semaine 13 - Séance 7

Exercice 13 Méthode des mélanges

Données :

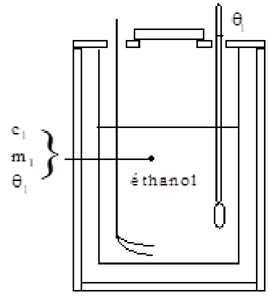
Substance	zinc	verre	eau
Capacité massique ($\text{kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$)	0,38	0,80	4,18

On dispose d'un calorimètre constitué d'un vase intérieur en zinc (masse $m_z = 300$ g) et d'un agitateur en verre (masse $m_v = 50$ g). Les transferts thermiques sont négligeables entre le vase extérieur et le contenu du calorimètre.

1. Calculer la capacité thermique C du calorimètre et de ses accessoires.

2. Ce dernier contient $m_1 = 400$ g d'éthanol à la température $\theta_1 = 17,5$°C ; on y verse $m_2 = 200$ g d'eau à la température $\theta_2 = 24,7$°C et on note la température lorsque l'équilibre est réalisé, soit $\theta_e = 20,6$°C.

   En déduire la valeur de la capacité thermique massique de l'éthanol.



état initial

À rédiger pour la semaine 14 - Séance 8

Exercice C4 — Étude de deux transformations

Considérons une quantité $n = 1,0$ mol d'un gaz supposé parfait (de coefficient $\gamma = 1,4$) à une pression $P_1 = 1,0$ bar et une température $T_1 = 300$ K. Le gaz est contenu dans un cylindre fermé par un piston de masse négligeable, le cylindre étant lui-même posé à l'intérieur d'une chambre dont il est possible de faire varier la pression et la température. On supposera à tout instant l'équilibre thermique entre la chambre et l'intérieur du cylindre. Le gaz est initialement dans l'état 1.
On commence par augmenter lentement la température à l'intérieur de la chambre jusqu'à atteindre une température $T_2 = 600$ K tout en maintenant la pression constante égale à P_1 à l'intérieur de la chambre au cours de la transformation. Le gaz est alors dans l'état 2.
On bloque ensuite le piston et on diminue lentement la température à l'intérieur de la chambre jusqu'à atteindre une pression $P_3 = 0,5$ bar à l'intérieur du cylindre. Le gaz est finalement dans l'état 3.
Tous les résultats numériques de cet EC doivent être donnés avec 3 chiffres significatifs.

1. Qualifier par un nom et deux adjectifs les transformations $1 \to 2$ et $2 \to 3$. Tracer les dans un diagramme de Clapeyron.

2. Donner les valeurs de toutes les variables d'état décrivant le gaz dans les états 1, 2 et 3. Commenter.

3. Calculer le travail des forces de pression et le transfert thermique pour les deux transformations.

4. En déduire la variation d'énergie interne de 1 à 2 et de 2 à 3 puis celle de 1 à 3.

5. Décrire une transformation simple permettant de passer de 1 à 3 directement ? Calculer le travail des forces de pression et le transfert thermique lors de cette transformation. Comparer aux résultats numériques de la question 3 et discuter à l'aide du diagramme de Clapeyron.

6. Calculer la variation d'énergie interne lors de la transformation précédente. Discuter.

Semaine 14 - Séance 8

DEUXIÈME PRINCIPE DES SYSTÈMES FERMÉS

Exercice 14 — Entropie du gaz parfait

1. À partir des identités thermodynamiques, donner l'expression de la différentielle de l'entropie pour un gaz parfait dans les variables (T, V). En déduire l'expression de la fonction $S(T, V)$.

2. Effectuer le même travail dans les variables (T, P).

3. Considérons les transformations de l'exercice 10.

   a. Réaliser un bilan d'entropie pour la compression isotherme lente $T1$ (c'est-à-dire qu'on calculera l'entropie échangée, l'entropie créée, la variation d'entropie du gaz).

   Commenter les signes de chacun des trois termes d'entropie.

   b. On considère maintenant une transformation monotherme rapide de même état initial et de même état final que la transformation précédente. La pression extérieure est constante et vaut P_0. Refaire le bilan d'entropie - calculer l'entropie échangée, l'entropie créée et la variation d'entropie du gaz – pour cette transformation.

   Commenter.

Exercice 15 — Contact avec un thermostat

On plonge un barreau de fer de masse m à la température T_1 dans un lac à la température T_0, et on attend l'équilibre final.
Données numériques : capacité thermique massique du fer : $c = 460$ J.K^{-1}.kg^{-1}
$m = 100$ g; $T_0 = 280$ K; $T_1 = 350$ K.

1. À partir d'une identité thermodynamique, donner l'expression de la différentielle dS de l'entropie pour une phase condensée. En déduire l'expression de la fonction $S(T, V)$.
2. Calculer l'entropie échangée; la variation d'entropie; l'entropie créée :
   a. pour le morceau de fer ; commenter les signes des trois grandeurs ;
   b. pour le thermostat ;
   c. pour l'ensemble {solide, lac} supposé isolé. Interpréter.

En préparation de l'IS

Finir les exercices 14 **et** 15

À rédiger pour la semaine 18 - Séance 9

Exercice C5 — Étude entropique d'un cycle

Considérons une quantité $n = 1,0$ mol de gaz supposé parfait, de coefficient $\gamma = 1,4$, subissant successivement les transformations suivantes :

* $A \rightarrow B$: détente isotherme lente de $P_A = 2,0$ bar et $T_A = 300$ K jusqu'à $P_B = 1,0$ bar ;
* $B \rightarrow C$: évolution isobare jusqu'à $V_C = 20,5$ L et T_C en restant en contact avec un thermostat à la température T_C tout au long de la transformation ;
* $C \rightarrow A$: compression adiabatique réversible.

1. Représenter ce cycle dans un diagramme de Clapeyron (P, V).
2. Redémontrer les formules de variation d'entropie ΔS en fonction des variables T et P puis V et P dans le cas d'un gaz parfait.
3. Déterminer les entropies échangées, créées et la variation d'entropie lors de la transformation $A \rightarrow B$ puis faire les applications numériques. Commenter.
4. Déterminer de même les entropies échangées, créées et la variation d'entropie lors des deux autres transformations puis faire les applications numériques. Ce cycle, tel que décrit plus haut, pourrait-il se faire dans le sens inverse ?
5. Représenter le cycle dans le diagramme entropique (T, S).

Semaine 18 - Séance 9

Exercice 16 — Gaz parfait dans un cylindre qui n'est pas calorifugé (étude entropique)

On considère un cylindre fermé à une extrémité et dans lequel peut coulisser verticalement un piston de masse négligeable. À l'intérieur de ce système, n moles d'un gaz parfait de capacités thermiques molaires constantes, occupent un volume V_i. L'ensemble est plongé dans un milieu dont la température T_0 est constante.
Les frottements sont négligeables.
Les parois du cylindre et le piston sont diathermanes (les transferts thermiques sont possibles).
Dans cet exercice, on réalise deux expériences au cours desquelles un opérateur fournit un même transfert mécanique W_0, mais de deux manières différentes :
Expérience ① : L'opérateur exerce une force $\vec{F_1}$ constante.
Expérience ② : L'opérateur enfonce lentement le piston.
Soit V_f le volume à l'équilibre.

I. Pour chaque expérience ① et ② :
   1. Caractériser la transformation subie par le gaz.
   2. Exprimer le rapport volumétrique $\frac{V_f}{V_i}$ en fonction de n, R, T_0 et W_0.
   3. Application numérique : $W_0 = 2nRT_0$.

II. Pour chaque expérience ① et ②, déterminer en fonction de n, R, T_0, $\frac{V_f}{V_i}$ les expressions de :
   1. la variation d'entropie du gaz pendant la transformation ;

2. l'entropie échangée par le gaz ;
3. l'entropie créée par le gaz. La transformation est-elle réversible ?

III. Le but de cette manipulation est, avec le même travail W_0, d'enfoncer le plus possible le piston (optimisation du transfert d'énergie). Comparer ① et ②.

CALCUL DIFFÉRENTIEL EN THERMODYNAMIQUE

Exercice 17 — Enthalpie massique d'un système indilatable et incompressible

Dans cet exercice, on considère les liquides comme des systèmes indilatables et incompressibles de capacités thermiques massiques c_P et c_V. On étudie l'influence de la pression et du volume sur l'état thermodynamique d'un liquide.

1. a. Déterminer pour un tel liquide, en fonction de c_P, c_V, P, v, T, les expressions des différentielles de : l'énergie interne massique u, l'entropie massique s, l'enthalpie massique h.

   b. Montrer que $c_P = c_V$.

2. Soient $2,00$ kg d'eau liquide à la température de 300 K et à la pression de $1,00$ MPa. Calculer la variation d'enthalpie de l'eau liquide :

   a. lorsqu'on augmente sa température de 30% sous la pression de $1,00$ MPa ;

   b. lorsqu'on augmente sa pression de $30,0\%$ à la température de 300 K.
   Données numériques : $v = 1,00.10^{-3}$ m^3.kg^{-1}; $c = 4,18$ kJ.kg^{-1}.K^{-1}

   c. En déduire une expression approchée de dh pour les liquides.

À rédiger pour la semaine 19 - Séance 10

Exercice C6 — Préparation au TP de calorimétrie (non noté)

On dispose d'un calorimètre constitué d'un vase intérieur et d'un agitateur Le tout ayant une capacité calorifique C. Les transferts thermiques sont négligeables entre le vase extérieur et le contenu du calorimètre.

A. Le calorimètre est initialement rempli d'une masse m_1 d'eau de capacité thermique massique c_1 à la température θ_1.

   Une résistance est immergée dans l'eau du calorimètre. La capacité thermique de la résistance est considérée négligeable. La résistance est branchée en série avec un générateur et un interrupteur. Initialement le circuit est ouvert et la résistance est à la température θ_1.

   Au temps $t = 0$, on ferme le circuit. La tension à ses bornes est U et l'intensité du courant qui la traverse est I.

   Montrer que la courbe représentant les variations de la température θ du liquide en fonction du temps est une portion de droite, dont on déterminera le coefficient directeur a_1 en fonction de m_1, c_1, C et P (puissance électrique reçue par la résistance).

   En déduire en fonction de m_1, a_1, C, U et I l'expression de c_1,

B. Le calorimètre est initialement rempli d'une masse m_1 d'eau de capacité thermique c_1 à la température θ_1. On y plonge une masse m_2 de cuivre de capacité thermique massique c_2 à la température θ_2.

   À l'équilibre, l'eau dans le calorimètre est la température θ_3.

   Donner l'expression de c_2 en fonction de m_1, m_2, θ_1, θ_2, θ_3, c_1 et C.

   Si l'on plonge une barre en métal chauffée à blanc dans de l'eau à température ambiante. Combien de temps environ doit-on laisser la barre en métal avant de pouvoir la toucher à mains nues ?

Semaine 19 - Séance 10

MACHINES THERMIQUES

Exercice 18 — Machine de Carnot

n moles d'un gaz parfait décrivent un cycle de Carnot A, B, C, D, A en échangeant des transferts thermiques avec deux sources T_1 et T_2.

- Compression isotherme AB au contact de la source T_2.
- Détente adiabatique BC amenant le gaz à la température T_1.
- Détente isotherme CD au contact de la source T_1.
- Compression adiabatique DA amenant le gaz à la température T_2.

Les transformations sont toutes réversibles.

1. Représenter l'allure du cycle dans un diagramme de Clapeyron (P, V) et dans un diagramme entropique (T, S). Ce cycle est-il moteur ou récepteur ?
2. On pose $\alpha = \frac{V_A}{V_B}$.
   Déterminer les expressions, dans cet ordre, et en fonction de n, T_1, T_2 et α du :
   * transfert thermique reçu par le gaz au cours de la transformation $A \to B$;
   * transfert thermique reçu par le gaz au cours de la transformation $C \to D$;
   * travail reçu par le gaz au cours d'un cycle.
3. En supposant qu'il s'agit du cycle d'un réfrigérateur, calculer l'efficacité thermique de cette machine thermique. Cette efficacité dépend-elle de α ?

Exercice 19 Cycle de Lenoir

Le premier moteur à deux temps a fonctionné suivant un cycle de Lenoir :

* $0 \to 1$ (admission) : entrée isobare du mélange air – combustible à la pression atmosphérique. En 1 : étincelle à la bougie ;
* $1 \to 2$ (combustion): combustion isochore du mélange ;
* $2 \to 3$ (temps moteur) : détente adiabatique réversible ;
* $3 \to 1 \to 0$ (échappement) : évacuation isobare des gaz brûlés.

1. On assimile le mélange gazeux à un gaz parfait de coefficient isentropique $\gamma = \frac{c_P}{c_V}$. Représenter l'allure du cycle en coordonnées (P, V).
2. On appelle rapport de compression, la quantité $\tau = \frac{P_2}{P_1}$. Exprimer en fonction de τ et γ le rendement thermodynamique ρ du cycle.
3. Ce cycle ditherme est-il réversible ? Commentaires.

Semaine 20 - Séance 11

Exercice 20 Pompe à chaleur (1)

Une pompe à chaleur réversible fonctionne entre deux sources thermiques constituées par l'eau d'un lac à température constante $\theta_0 = 10°$C et par une masse M d'eau thermiquement isolée (sauf de la pompe), initialement à la température T_i. La machine fonctionne de telle sorte que la masse M s'échauffe jusqu'à une température T_f. On notera c la capacité thermique massique de l'eau.

1. Pendant la durée dt d'un cycle, la machine reçoit (algébriquement) le travail élémentaire δW de l'extérieur et le transfert thermique élémentaire δQ de la masse M d'eau. Pendant ce temps, la température T de la masse M varie de dT. Trouver une relation entre δW et dT.
2. Calculer W en fonction de T_i, T_f et de T_0, la température du lac.
   A.N. : $M = 1$ t, $T_i = T_0$; $T_f = 313$ K
3. Calculer l'élévation de température de la masse M si le même travail W avait été utilisé par une résistance chauffante.

À rédiger pour la semaine 21 - Séance 12

Exercice C7 Étude d'un congélateur

On souhaite refroidir un bloc solide de masse $m = 150$ g et de capacité thermique massique $c = 2,4$ kJ.K^{-1}.kg^{-1}initialement à la température de la pièce à l'aide d'un congélateur. Le congélateur fonctionne grâce à un compresseur de puissance $P = 250$ W, la température du bac du congélateur est $T_i = -18°$C et la température de la pièce est $T_e = 19°$C.

1. Rappeler le principe de fonctionnement d'un congélateur. Parmi les trois machines thermiques vues en cours, de laquelle s'agit-il ? Sur un schéma, représenter la machine thermique considérée en faisant apparaitre les différents flux énergétiques reçus par le système.
2. Donner le signe de chacun de ces flux, identifier le fluide (système) utilisé, les différentes sources ainsi qu'un ordre de grandeur de l'efficacité d'une telle machine.

3. Définir l'efficacité du congélateur et redémontrer la formule dans le cas d'une machine de Carnot. Donner la puissance thermique reçue par le fluide venant de la source froide dans le cas d'une machine de Carnot.

4. On supposera que toute cette puissance thermique est utilisée pour refroidir le bloc solide. En considérant toujours une machine de Carnot, déterminer le temps nécessaire pour refroidir l'objet à la température du congélateur. Discuter.

5. En pratique, l'efficacité du congélateur est plutôt $e = 3,2$. Combien de temps est-il maintenant nécessaire pour refroidir l'objet ? Discuter la validité du modèle utilisé et les hypothèses qui pourraient ne pas être vérifiées.

Semaine 21 - Séance 12

Exercice 21 — **Pompe à chaleur** (2)

Le chauffage d'une maison individuelle est assuré par une pompe à chaleur dont les n moles de fluide décrivent un cycle de Carnot.
L'intérieur de la maison constitue la source chaude ($\theta_c = 20°\text{C}$), le milieu extérieur constitue la source froide ($\theta_f = 0°\text{C}$).
La puissance de chauffe que fournit l'installation à l'intérieur de la maison est de 10 kW.

1. Écrire le bilan énergétique et le bilan entropique pour un cycle de cette machine.

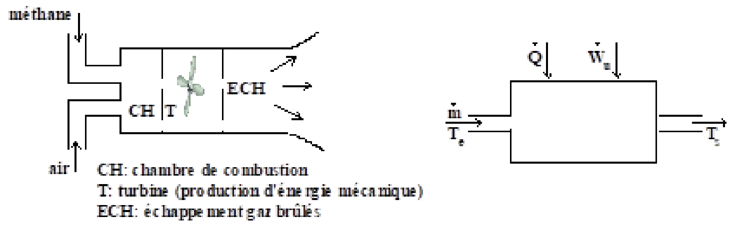
2. Calculer la puissance mécanique absorbée pour un cycle.

3. Calculer par deux méthodes l'efficacité thermique de la pompe à chaleur.

SYSTÈMES OUVERTS EN ÉCOULEMENT PERMANENT

Exercice 22 — **Turbine à gaz**

Une turbine à gaz est une machine qui produit de l'énergie mécanique à partir de l'énergie thermique libérée par la combustion d'un gaz (méthane).



TURBINE A GAZ — SON MODELE

Données numériques : Débit massique total : $\dot{m} = 0,560 \text{ kg.s}^{-1}$
Gaz entrant (air et méthane) : $T_e = 300$ K
Puissance thermique reçue par le gaz dans la chambre de combustion : $P_{th} = 800$ kW
Gaz sortant (produits de combustion) : $T_s = 103$ K
Hypothèses :

* les gaz en écoulement sont assimilés à de l'air (gaz parfait de $c_P = 1,00.10^3 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$) ;
* les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle des gaz sont négligeables.

1. Calculer la puissance utile de la turbine.

2. Calculer son rendement thermodynamique.

À rédiger pour la semaine 23 - Séance 13

Exercice C8 — **Réchauffer une serre**

On souhaite maintenir la température à l'intérieur d'une serre à une valeur de consigne $T_{int} = 20°\text{C}$ supérieure à la température extérieure $T_{ext} = 0°\text{C}$. La serre est un parallélépipède de hauteur $h = 3,75$ m de base au sol carrée de côté $a = 25$ m.
On supposera que l'air de la serre n'échange pas d'énergie thermique avec le sol, mais uniquement avec les surfaces en contact avec l'air extérieur. La puissance thermique surfacique échangée avec l'extérieur est alors $\varphi = 40 \text{ W.m}^{-2}$.

1. En posant P_{th} la puissance thermique reçue par l'air de la serre depuis l'extérieur, donner le signe de P_{th}. Montrer que $|P_{th}| = 40$ kW.

Supposons dans un premier temps que l'air de la serre est chauffé à l'aide d'une chaudière agissant comme un thermostat de température $T_{ch} = 600$ K. Pour ce faire, on considère un circuit d'eau pouvant être alternativement au contact de la chaudière et de l'air de la serre par l'intermédiaire d'un échangeur thermique. La température de l'eau en sortie de la chaudière est $T_C = 80°$C, tandis qu'elle est de $T_F = 20°$C en entrée de chaudière.

2. Faire un schéma du circuit d'eau. Quelle est la température de l'eau lorsqu'elle entre en contact avec l'air de la serre ? Lorsqu'elle cesse d'être en contact avec l'air de la serre ?
3. Si ce dispositif permet de compenser exactement les pertes thermiques dues aux échanges avec l'air à l'extérieur de la serre, déterminer la valeur du débit massique de l'eau dans ce circuit.
4. Quel est le rapport entre la puissance thermique reçue par l'air intérieur de la serre divisée par la puissance thermique délivrée par la chaudière ?

Supposons maintenant que la chaudière est utilisée comme source chaude d'un moteur qui alimente une pompe à chaleur qui réchauffe l'air de la serre. La source froide utilisée par le moteur et la pompe à chaleur est l'air extérieur. On supposera que ces machines thermiques sont réversibles.

5. Donner le rendement du moteur ainsi que l'efficacité de la pompe à chaleur en fonction des données de l'énoncé.
6. Calculer le nouveau rapport entre la puissance thermique reçue par l'air intérieur de la serre divisée par la puissance thermique délivrée par la chaudière. Discuter.

En préparation du DS (non noté)

Exercice C9 Accélération d'un gaz dans une tuyère

De l'air comprimé se détend dans une tuyère. Les données et hypothèses sont les suivantes :

* La tuyère est parfaitement calorifugée.
* L'air est assimilé à un gaz parfait, de capacité thermique massique à pression constante $c_P = 1,00$ kJ.K^{-1}.kg^{-1}et de masse molaire $M = 28,8$ g.mol^{-1};
* À l'entrée de la tuyère, sa vitesse est négligeable et l'air est dans un état A: $T_A = 600$ K et $P_A = 5,00$ bar.
* À la sortie de la tuyère, sa pression est $P_B = 1,00$ bar. La section de sortie de la tuyère est $\Sigma = 1,00$ cm^2.

1. La détente est isentropique. Déterminer :
   a. la température de sortie T_B de l'air ;
   b. la vitesse de sortie $||\vec{v}_b||$ de l'air ;
   c. le débit massique d'air.
2. On modélise l'irréversibilité de la détente par une transformation polytropique de coefficient $k = 1,36$.

   Cela signifie que la pression et le volume massique du gaz sont reliés par la relation : $P.v^k = constante$.
   a. Déterminer à nouveau la vitesse et le débit d'air.
   b. Représenter ces deux détentes dans un diagramme entropique (on assimilera les transformations à des segments).
   c. Déterminer l'énergie dissipée ε à la traversée de la tuyère.

Au cours d'une transformation de l'état initial (i) à l'état final (f), l'énergie dissipée ε vaut $\varepsilon = \displaystyle\int_i^f T\delta s^c$.

Exercice C10 Échangeur de chaleur

De l'air chaud ($c_P = 1$ kJ.K^{-1}.kg^{-1}) à l'état 1 ($P_1 = 6$ bar, $T_1 = 500$ K) est refroidi de façon isobare jusqu'à la température T_0 de 300 K, dans un échangeur parfaitement calorifugé.
Le fluide réfrigérant est constitué par de l'eau qui entre à $\theta_e = 12°$C et qui sort à la température θ_s. Le débit de l'eau est 100 g.s^{-1}et celui de l'air 6,5 g.s^{-1}. Calculer θ_s.